

Pyrolysis of *Spirulina platensis* Residue: Effect of Temperature without and with Fe-oxide catalyst

Pirolisis Spirulina platensis Residue: Pengaruh Suhu Tanpa dan Dengan Katalis Fe-oxide

Siti Jamilatun ^{a,1,*}, Tyas Aji Kurniawan ^{a,2}, Adhi Chandra Purnama ^{a,3}, Irfan Maulana Putra ^{a,4}

^a Program Studi Teknik Kimia, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Bantul, D. I. Yogyakarta, 55191, Indonesia

¹ sitijamilatun@che.uad.ac.id; ² sidiqfarhat@gmail.com; ³ gusadhialhabsyi@gmail.com; ⁴ irfan1700020157@webmail.uad.ac.id

* corresponding author

ARTICLE INFO

Article history

Received September 28, 2020

Revised January 10, 2021

Accepted January 31, 2021

Keywords

Bio-oil

Fe-oxide

Pyrolysis

Spirulina platensis residue

ABSTRACT

*The limited fuel reserves must be addressed immediately. One of the biomass that has the potential for renewable energy is microalgae. The advantages of microalgae compared to other biomass is the oil produced, the speed of growth, and does not interfere with food availability. The processing of residual *Spirulina platensis* microalgae (SPR) by pyrolysis is simple and does not cause pollution. This study's purpose was SPR pyrolysis with a grain size of 140 mesh without and with 5wt.% Fe-oxide catalyst. The variables studied were temperature on the yield of bio-oil products, water phase, charcoal, and gas. Pyrolysis was carried out in a fixed bed reactor at 300, 400, 500, 550, and 600 °C. The higher the pyrolysis temperature, the higher the bio-oil yield, with the optimum catalyst at 400 °C produced 15.34% and without a catalyst at a temperature of 500 °C produced 15.00%. The water yield phase in the range of 300-600 °C is higher for catalyst use (30%-39%) than without catalyst (13.75%-22.25%). The higher the pyrolysis temperature, the lower the yield char. The yield of gas without a catalyst was higher in the range of 30.69%-38.94% compared to catalyst 12.58%-26.18%. At a temperature of 300 °C without a catalyst, the conversion obtained was 48.69%, while with catalyst, 60.08%.*

This is an open access article under the CC-BY-SA license.



1. Pendahuluan

Saat ini kebutuhan minyak bumi dan BBM dalam negeri dipenuhi dari produksi minyak bumi dalam negeri, impor minyak bumi dan impor BBM. Meskipun minyak bumi dengan spesifikasi kilang telah diproses di kilang minyak dalam negeri, namun tidak bertambahnya kapasitas kilang selama 20 tahun terakhir dan konsumsi BBM yang terus meningkat menyebabkan impor BBM semakin besar dari tahun ke tahun. Dalam kurun waktu dari 2017-2050 diperkirakan impor minyak bumi akan meningkat 5 kali lipat, meningkat dari 181,9 juta barel pada tahun 2017 menjadi 924,9 juta barel pada tahun 2050 dengan pertumbuhan 5,1% per tahun. Minyak bumi yang tidak dapat diproses di kilang akan diekspor dan jumlahnya terus menurun sampai tidak ada lagi ekspor pada tahun 2036. Bila ekspor ini dipertimbangkan maka *net import* minyak bumi dalam kurun waktu tersebut diperkirakan akan meningkat dari 79,2 juta barel pada tahun 2017 menjadi 924,9 juta barel pada tahun 2050 dengan tingkat pertumbuhan 7,7% per tahun [1].

Menipisnya cadangan minyak bumi berbasis fosil dan peningkatan impor BBM mendesak untuk ditanggulangi dengan menyediakan bahan bakar terbarukan yang aman bagi lingkungan [2,3]. Salah

satu sumber energi terbarukan yang melimpah adalah biomassa, dan yang potensial untuk dikembangkan adalah biomassa generasi ketiga yakni mikroalga [4]. Mikroalga memiliki beberapa keuntungan dibandingkan sumber energi biomassa lainnya karena tingkat pertumbuhannya sangat tinggi (hingga 20 g ganggang kering per m² per hari), hasil per area juga tinggi, yakni 10-23 kali lebih tinggi dari kelapa sawit. Selain itu, efisiensi yang tinggi dalam hal menangkap CO₂ dan konversi energi surya, tidak berkompetisi dengan bahan pangan, tumbuh di perairan terbuka (air laut dan kolam) dan dalam photobioreaktor di lahan non-pertanian, dan tidak membutuhkan lahan yang luas untuk pertumbuhannya [5,6,7].

Pengolahan biomassa mikroalga dengan pirolisis sangat menguntungkan, penggunaan teknologi sederhana, tidak membutuhkan bahan aditif yang berbahaya dan tidak menghasilkan limbah [9,10]. Produk pirolisis mikroalga berupa bio-oil, *water phase*, *char* dan gas [11]. Bio-oil dan gas dapat digunakan sebagai bahan bakar, *water phase* digunakan sebagai bahan aditif untuk pengawetan makanan dan mengandung komponen sebagai suplemen, sedangkan *char* dapat digunakan sebagai adsorben dalam bidang makanan, farmasi, pengolahan limbah dll. Produk pirolisis sangat bergantung pada beberapa parameter yaitu komposisi biomassa, *heating rate*, suhu pirolisis, waktu tinggal, ukuran butir biomassa, dan penggunaan katalis [5,8,11].

Bio-oil hasil pirolisis masih mengandung senyawa oksigenat yang berpotensi menyebabkan korosi pada mesin. Oleh karena itu bio-oil masih membutuhkan perlakuan untuk mengurangi kandungan oksigenat, salah satu cara adalah pemakaian katalis dalam pirolisis [12,13]. Jamilatun *et al.*, 2019 [14] telah menggunakan silika-alumina dalam pirolisis mikroalga *Spirulina platensis* residue (SPR), hasilnya adalah perbaikan kualitas bio-oil dengan pengurangan kandungan oksigenat dari 60,28% menjadi 32,15 wt.%, atau terjadi penurunan senyawa oksigenat sekitar 46,67%. Tambahan lagi, peningkatan nilai kalor rata-rata dari 16,66 MJ/kg menjadi 23,63 MJ/kg, meningkat sebesar 41,84%. Disamping perbaikan kualitas bio-oil maka pirolisis katalitik ini menghasilkan *syngas* lebih banyak tetapi terjadi penurunan *yield* bio-oil dibanding pirolisis tanpa katalis [14,15].

Besi oksida dianggap sebagai bahan katalitik yang menjanjikan karena efisiensinya yang tinggi, ramah lingkungan, dan biaya rendah. α -Fe₂O₃ (*hematite*) adalah salah satu polimorf oksida besi yang paling stabil dalam kondisi ambien dan digunakan dalam berbagai bidang katalisis, terutama dalam reaksi reduksi/oksidasi dan asam/basa. Fe₂O₃ berguna untuk oksidasi CO, oksidasi air fotokatalitik, reduksi NO_x menjadi NH₃ pada knalpot diesel [16].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu pada pirolisis tanpa dan dengan penambahan katalis Fe-Oksida 5 wt.% terhadap *yield* produk (bio-oil, *water phase*, *char*, dan gas) dan konversi. Bahan baku berupa SPR dengan ukuran butir 140 mesh terlebih dahulu dianalisis proksimat dan ultimat sebelum digunakan. Penelitian ini dijalankan dengan *heating rate* dijaga konstan yakni pada kisaran 8-15 °C/menit. Pirolisis dilakukan dengan *fixed-bed reactor* yang terdiri dari dua silinder yang disusun seri secara *vertical*, silinder pertama untuk SPR, silinder kedua untuk katalis *Fe-oxide*. Produk pirolisis berupa bio-oil, *water phase*, *char* dan gas. Dari penelitian ini akan didapatkan kondisi optimum tanpa dan dengan pemakaian katalis.

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan dan Alat

1) *Spirulina platensis* Residue (SPR)

SPR kering dengan ukuran 140 mesh diperoleh dari residu padat ekstraksi *Spirulina platensis* (SP) segar. Sampel SPR dan SP dianalisis ultimat dan proksimat dan nilai HHV-nya. Analisis proksimat dilakukan di Laboratorium Pangan dan Hasil Pertanian, Departemen Teknologi Pertanian dan Lab Pangan dan Gizi dari Pusat Antar Universitas (PAU) UGM [2,14]. Adapun analisis ultimat di Laboratorium Analisis dan Pengujian, Puslitbang Tekmira Bandung.

Hasil analisis proksimat dan ultimat SPR dan SP mempunyai komposisi yang hampir sama, seperti *ash* (8,63–8,69 wt.%), *volatile* (67,03–68,31 wt.%) dan *fixed carbon* (12,51–12,77 wt.%). Dari hasil analisis *ultimate* untuk komponen C (41,36–41,91 wt.%), H (6,60–6,82 wt.%), dan N (7,17–8,89 wt.%), kecuali pada O mengalami sedikit kenaikan dengan SP sebanyak 33,04 wt.% dan pada SPR 35,33 wt.%. Sedangkan untuk analisis proksimat terlihat *lipid* pada SP (0,25 wt.%) dan SPR (0,09 wt.%) sangat rendah [11]. Berdasarkan perbandingan hasil analisis sebelum dan sesudah

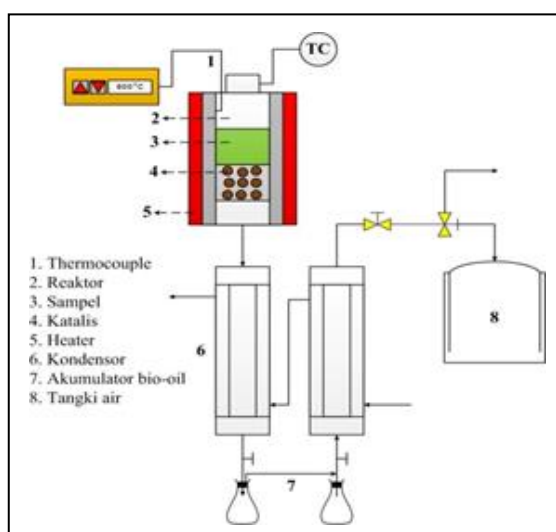
ekstraksi adalah bahan tidak mengalami perubahan komposisi yang berarti, hal ini karena kandungan *lipid* pada SP sangat rendah maka pengaruh ekstraksi tidak begitu terlihat.

2) Fe-oxide

Katalis yang digunakan yaitu *Fe-oxide* yang diperoleh dari PT Pupuk Kujang Cikampek Jawa Barat dalam bentuk pellet berwarna coklat kehitaman. *Fe-oxide powder* ukuran partikel kurang dari 50 nm (*nanopowder*), *surface area* 50-245 m²/g. Berdasarkan hasil analisis *Fe-oxide* dengan SEM, diperoleh hasil komposisi C, O, Cr, Fe, dan Cu masing-masing adalah 8,04; 28,75; 4,93; 56,64 dan 1,64 wt.%.

3) Alat Penelitian

Percobaan proses pirolisis mikroalga SPR dengan penambahan katalis *Fe-oxide* menggunakan *fixed-bed reactor* yang terbuat dari *stainless steel* memiliki dimensi: diameter dalam 40 mm, diameter luar 44 mm dan tinggi 60 mm. Reaktor dilengkapi dengan pemanas. Diagram alat untuk sistem *fixed-bed reactor* disajikan pada Gambar 1. Reaktor dipanaskan secara eksternal oleh tanur listrik, lalu suhu dikendalikan secara manual dengan mengatur voltase pada voltmeter yang terhubung dengan *thermocouple* NiCr-Ni yang ditempatkan di luar tungku. Kondensor digunakan untuk mengembunkan gas hasil pirolisis sebelum ditampung pada penampung [5,11,14,17].



Gambar 1. Rangkaian Alat Percobaan

2.2. Prosedur Penelitian

Lima puluh (50) gram SPR dimasukkan dalam silinder satu bagian atas, kemudian katalis *Fe-oxide* 5 wt.% dimasukkan dalam silinder dua pada *fixed-bed reactor* sesuai susunan. Setelah itu ditutup rapat dan dipanaskan. Sampel yang diuji dipanaskan dengan tingkat pemanasan konstan dari suhu kamar sampai ke suhu yang diinginkan (300, 400, 500, 550, 600 °C). Untuk mengetahui suhu sudah tercapai digunakan *thermocouple* yang dimasukkan dari atas lubang reaktor. Produk cair keluar kondensor dikumpulkan dalam akumulator, produk gas dijerap dengan air pada gallon air dan *char* diambil sesudah proses selesai. Bio-oil dan *water phase* dapat diukur beratnya, *char* ditimbang dan gas dihitung dari selisih berat awal dikurangi berat cairan dan *char*. *Yield* produk meliputi bio-oil, *water phase*, *tar*, *char*, dan gas. *Yield* produk beserta konversi pirolisis dihitung dengan persamaan 1-7 [17].

Total produk cair, berat bio-oil dan berat gas dihitung dengan persamaan [2,17] :

$$Y_L = \left[\frac{W_L}{W_M} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_B = \left[\frac{W_B}{W_M} \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_A = \left[\frac{W_A}{W_M} \right] \times 100\% \quad (3)$$

$$Y_C = \left[\frac{W_C}{W_M} \right] \times 100\% \quad (4)$$

$$Y_G = 1 - [Y_L - Y_C] \quad (5)$$

$$W_L = [W_B + W_A] \quad (6)$$

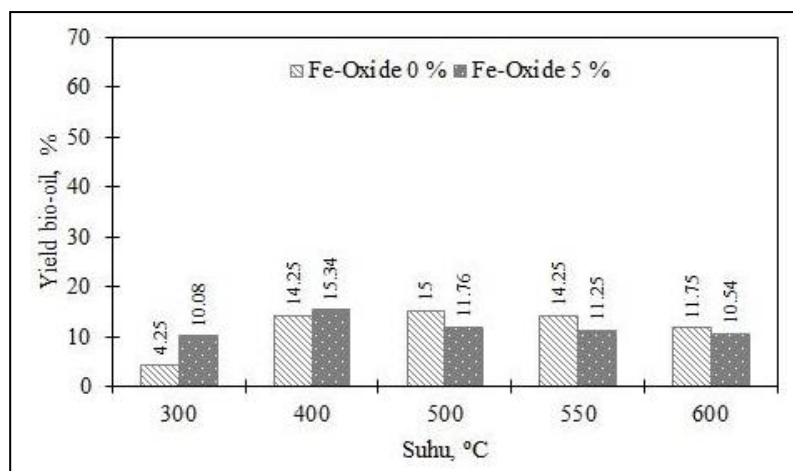
$$X = \left[\frac{W_B + W_A + W_G}{W_M} \right] \times 100\% \quad (7)$$

Dalam hal ini, Y_L adalah *yield* hasil produk cair atau tar; W_L adalah berat dari produk cair atau tar; W_M adalah berat SPR; Y_A adalah *yield* produk *water phase*; W_A adalah berat produk *water phase*; Y_B adalah *yield* bio-oil; W_B adalah berat bio-oil; Y_C adalah *yield* char; W_C adalah berat char dan Y_G adalah *yield* gas produk. X adalah konversi pirolisis.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Yield Bio-oil

Pengaruh suhu tanpa katalis dan pemakaian katalis *Fe-oxide* 5 wt.% terhadap *yield* bio-oil pada pirolisis SPR dengan ukuran butiran 140 mesh disajikan pada Gambar 2, perhitungan *yield* bio-oil menggunakan Persamaan 1.



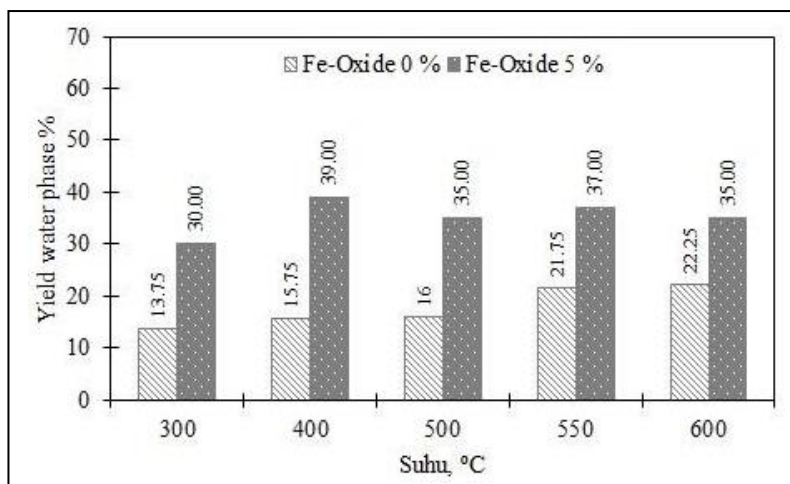
Gambar 2. Pengaruh suhu terhadap *yield* bio-oil tanpa dan dengan *Fe-oxide* 5 wt.%

Berdasarkan Gambar 2, dapat dilihat pengaruh suhu terhadap *yield* bio oil pada pirolisis SPR dengan katalis pada suhu 300 °C diperoleh *yield* sebesar 10,08%, sedangkan tanpa katalis diperoleh 4,25%. *Yield* maksimum dengan katalis diperoleh pada 400 °C sebesar 15,34%, sesudah itu turun sampai 10,54% pada 600 °C. Adapun tanpa katalis diperoleh suhu optimum pada 500 °C yakni 15,00%, sesudah itu turun sampai 11,75% pada 600 °C. Kondisi ini dapat diartikan bahwa proses perengkahan atau *cracking* dengan katalis paling aktif terjadi pada suhu 400 °C, terjadi pemutusan ikatan C-C dari rantai karbon panjang (polimer) dengan berat molekul besar menjadi rantai karbon pendek (monomer) dengan berat molekul yang kecil. Meningkatnya suhu menyebabkan proses perengkahan semakin baik, rantai hidrokarbon yang terputus ikatannya juga semakin banyak sehingga menyebabkan *yield* semakin tinggi [13]. Perengkahan tanpa katalis paling aktif terjadi pada 500 °C, dicapai lebih tinggi daripada dengan katalis 400 °C. Pada pemakaian katalis mulai 500 °C jumlah bio-oil semakin menurun, hal ini disebabkan terjadinya *secondary cracking* dimana tar yang dihasilkan dari *primary cracking* akan terdekomposisi menjadi gas dan char [18]. Dekomposisi lanjutan ini akan menyebabkan *yield* gas semakin naik, sebaliknya *yield* bio-oil menurun [2]. Penambahan pembentukan char pada *secondary cracking* sangat kecil sehingga tidak berpengaruh terhadap pembentukan char [19].

3.2. Yield water phase

Pengaruh suhu tanpa dan dengan katalis *Fe-oxide* 5 wt.% terhadap pembentukan *water phase* dengan ukuran butiran SPR 140 mesh disajikan pada Gambar 3, perhitungan menggunakan

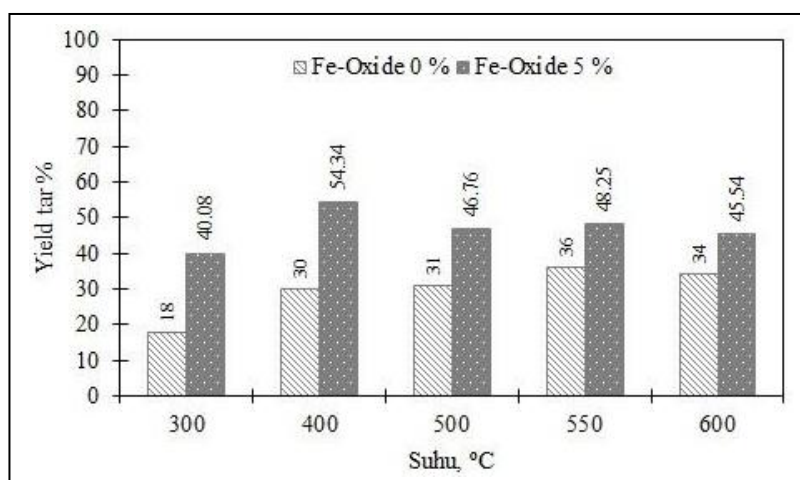
Persamaan 2. Gambar tersebut menjelaskan pengaruh suhu terhadap *yield water phase*, pada suhu 300 °C dengan katalis *yield water phase* yang diperoleh sebesar 30%. Pada suhu 400 °C naik menjadi 39%, selanjutnya pada suhu 500, 550, dan 600 °C *yield water phase* turun naik kemudian turun kembali, yakni 35%, 39%, dan 35%. Secara keseluruhan kisaran suhu *yield water phase* pada kisaran 30-39%. Pada suhu optimum 400 °C saat menghasilkan *yield bio-oil* maksimum, diperoleh *yield water phase* cukup tinggi sebesar 39%. *Yield water phase* pada kisaran 300-600 °C tanpa katalis secara keseluruhan lebih rendah (13,75%-22,25%) jika dibandingkan dengan pemakaian katalis 5 wt.% (30,00%-39,00%). Fenomena ini disebabkan terjadinya reaksi hidrogenasi dan hidrodeoksigenasi yang lebih aktif sehingga pembentukan air lebih banyak [14,20].



Gambar 3. Pengaruh suhu terhadap *yield water phase* tanpa dan dengan *Fe-oxide* 5 wt.%

3.3. Yield Tar

Tar adalah campuran produk bio-oil dan *water phase* atau disebut juga produk cair. Pengaruh suhu tanpa dan dengan pemakaian *Fe-oxide* 5 wt.% hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4, perhitungan mengikuti Persamaan 6.



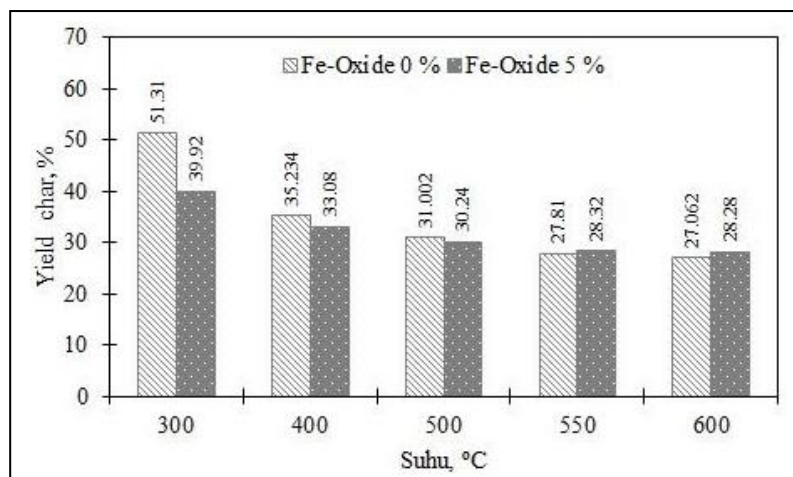
Gambar 4. Pengaruh suhu terhadap *yield tar* tanpa dan dengan *Fe-oxide* 5 wt.%

Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada pirolisis 300-600 °C jumlah tar dengan katalis lebih tinggi dibandingkan tanpa katalis. Pengaruh katalis dalam mengaktifkan reaksi hidrogenasi dan hidrodeoksigenasi lebih dominan daripada pengaruh kandungan air dalam SPR. Kondisi optimum tar pada pemakaian katalis diperoleh pada suhu 400 °C yakni 54,34%, sedangkan tanpa katalis diperoleh pada 550 °C yakni 36%.

3.4. Yield Char

Pengaruh suhu terhadap *yield char* tanpa dan dengan katalis ditampilkan pada Gambar 5, perhitungan mengikuti Persamaan 4. Berdasarkan gambar tersebut untuk pirolisis dengan dan tanpa

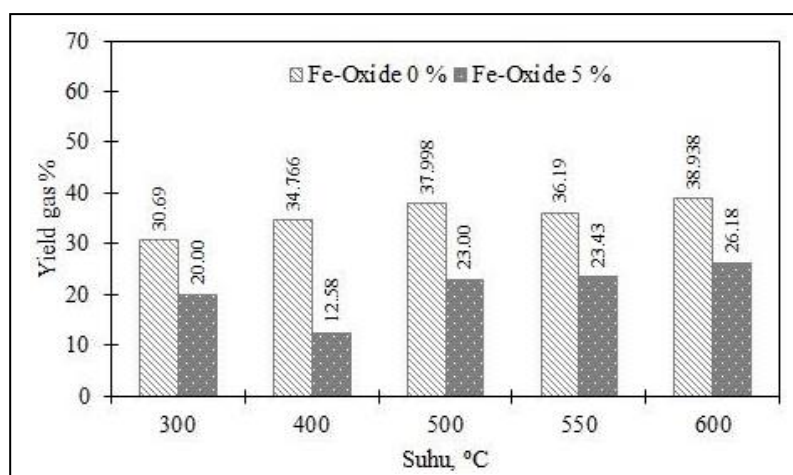
katalis dapat dilihat semakin tinggi suhu pirolisis semakin turun *yield char*. Pada suhu 300, 400, 500, 550, dan 600 °C persentase *yield char* masing-masing sebesar 39,92; 33,08; 30,24; 28,32 dan 28,20. Pirolisis pada suhu rendah kurang dari 400 °C atau pemanasan rendah relatif menghasilkan tingkat *char* yang lebih tinggi. Semakin tinggi suhu pirolisis maka dekomposisi semakin meningkat sehingga produk cairan dan gas semakin banyak, hal ini menyebabkan *yield char* semakin turun. *Heating rate* tinggi dan waktu tinggal yang lebih lama juga menyebabkan reaksi *secondary cracking* lebih aktif, maka *yield char* semakin turun [20,21,22]. Pada pirolisis tanpa katalis suhu 300 °C diperoleh *yield char* jauh lebih tinggi yakni 51,31% dibanding dengan katalis 39,92%. Untuk suhu 400-600 °C dengan dan tanpa katalis pengaruhnya tidak signifikan terhadap *yield char*.



Gambar 5. Pengaruh suhu terhadap *yield char* tanpa dan dengan *Fe-oxide* 5 wt.%.

3.5. Yield Gas

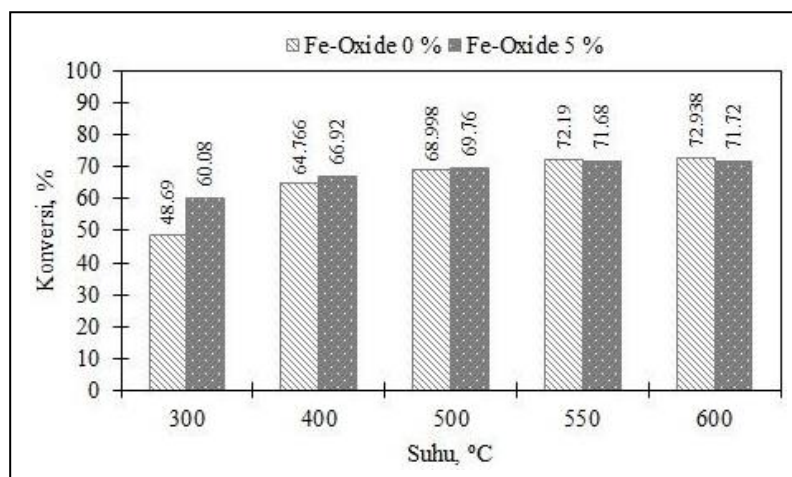
Pengaruh suhu terhadap *yield gas* tanpa dan dengan katalis *Fe-oxide* 5 wt.% disajikan pada Gambar 6, perhitungan mengikuti Persamaan 5. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa dengan katalis *yield gas* pada suhu 300 °C sebesar 20,00%, menurun pada suhu 40 °C (13%). Selanjutnya persentase *yield gas* akan naik pada suhu 500, 550, dan 600 °C, berturut-turut adalah 23,00; 23,43 dan 26,18%. Semakin tinggi suhu pirolisis maka *yield gas* semakin besar, sebaliknya pada 400 °C terjadi penurunan yang cukup drastis. Hal ini disebabkan pada suhu 400 °C *yield water phase* sangat tinggi, yakni 39% yang disebabkan karena reaksi hidrodoksigenasi dan hidrogenasi. Pada suhu lebih besar dari 600 °C pirolisis menghasilkan lebih banyak produk gas yang menyebabkan *yield bio-oil* rendah. Hal ini disebabkan adanya proses perengkahan dari mikroalga yang berhubungan dengan *secondary cracking*, apabila suhu semakin tinggi maka perengkahan akan meningkat [22]. Perbandingan *yield gas* pirolisis 300-600 °C tanpa dan dengan katalis adalah tanpa katalis lebih tinggi pada kisaran 30,69%-38,94% dibandingkan dengan *Fe-oxide* 12,58%-26,18%.



Gambar 6. Pengaruh suhu terhadap *yield gas* tanpa dan dengan *Fe-oxide* 5 wt.%

3.6. Konversi

Pirolisis tanpa dan dengan katalis mempunyai kecenderungan yang sama yakni semakin tinggi suhu konversi semakin meningkat, dapat dilihat pada Gambar 7. Perhitungan konversi mengikuti Persamaan 7. Pengaruh pemakaian *Fe-oxide* terlihat signifikan pada suhu 300 °C, tanpa dan dengan katalis masing-masing adalah 48,69% dan 60,08%. Pada suhu 500-600 °C pengaruh suhu dan *Fe-oxide* tidak signifikan pengaruhnya terhadap konversi. Pada suhu diatas 500 °C pengaruh katalis cenderung mengaktifkan terjadinya reaksi deoksigenasi, yakni pengurangan senyawa oksigenat pada *condensable gas* (bio-oil) [14].



Gambar 7. Pengaruh suhu terhadap konversi pada pemakaian *Fe-oxide* 5%

4. Kesimpulan

Pirolisis *Spirulina platensis* residue dengan ukuran butir 140 mesh tanpa dan dengan pemakaian *Fe-oxide* 5 wt.% dilakukan pada *fixed-bed reactor*, dengan *heating rate* 8-15 °C/menit dari suhu 300-600 °C. Semakin tinggi suhu pirolisis semakin naik *yield* bio-oil, optimum pada 400 °C untuk pemakaian *Fe-oxide* 5 wt.% yakni 15,34%. sesudah itu turun sampai 10,54% pada 600 °C. Pirolisis tanpa katalis diperoleh suhu optimum pada 500 °C yakni 15,00%, sesudah itu turun sampai 11,75% pada 600 °C. *Yield water phase* pada kisaran 300-600 °C lebih tinggi untuk pemakaian *Fe-oxide* (30-39%) dibandingkan tanpa katalis (13,75-22,25%). Kondisi optimum tar pada pemakaian katalis diperoleh pada suhu 400 °C yakni 54,34%, sedangkan tanpa katalis diperoleh pada 550 °C yakni 36%. Semakin tinggi suhu pirolisis semakin turun *yield char*. Pada pirolisis tanpa katalis suhu 300 °C diperoleh *yield char* jauh lebih tinggi yakni 51,31% dibanding dengan katalis 39,92%. *Yield gas* pada 300-600 °C tanpa katalis lebih tinggi pada kisaran 30,69%-38,94% dibandingkan dengan *Fe-oxide* 12,58%-26,18%. Pengaruh pemakaian *Fe-oxide* terlihat signifikan pada suhu 300 °C, tanpa katalis diperoleh konversi 48,69%, sedangkan dengan katalis 60,08%. Pada suhu 500-600 °C pengaruh suhu dan *Fe-oxide* tidak signifikan pengaruhnya terhadap konversi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dana penelitian melalui Skema Dana Penelitian Internal melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta dengan nomor kontrak: PD-237/SP3/LPPM-UAD/2020.

Daftar Pustaka

- [1] Badan pengkajian dan Penerapan Teknologi–Outlook Energi Indonesia 2019. (BPPT–OEI, 2019).
- [2] S. Jamilatun, Budhijanto, Rochmadi, and A. Budiman, “Thermal Decomposition and Kinetic Studies of Pyrolysis of Secondary cracking. *International Journal of Renewable Energy Development*, 6(3), 193–201, 2017.
- [3] S. Jamilatun, D. Kusuma, ASS. Shakti dan F. Ferdiant, "Pembuatan Biocoal Sebagai Bahan Bakar Alternatif dari Batubara dengan Campuran Arang Serbuk Gergaji Kayu Jati, Glugu dan Sekam Padi", *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”*, Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia, ISSN 1693 – 4393, 2010.

- [4] C. Kilic, Gokhan, SAKI. and Gokpinar, S., "Comparing to The Vomit of In Two Different *Spirulina platensis* Growth Features", *Fish Aquat. Sci.*, 23, 189-192. 2006.
- [5] S. Jamilatun, Budhijanto, Rochmadi, A. Yuliestyan, H. Hadiyanto, and A. Budiman, "Comparative analysis between pyrolysis products of *Spirulina platensis* biomass and its residues", *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 8, no. 2, pp. 133-140, 2019.
- [6] A. Campanella, R. Muncrief, M.P. Harold, D.C. Griffith, N.M. Whitton, and R.S. Weber, "Thermolysis of microalgae and duckweed in a CO₂- wept fixed-bed reactor: Bio-oil yield and compositional effects". *Bioresource Technology*, 109, 154-162, 2012.
- [7] S.O. Gultom, C. Zamalloa, and B. Hu, "Microalgae Harvest through Fungal Palletization Co-Culture of *Chlorella Vulgaris* and *Aspergillus niger*". *Journal Energies*. 7(7):4417-442, 2014.
- [8] S. Jamilatun, Budhijanto, Rochmadi, A. Yuliestyan, and A. Budiman, "Valuable Chemicals Derived from Pyrolysis Liquid Products of Secondary cracking", *Indones. J. Chem.*, 19 (3), 703 – 711, 2019.
- [9] Z. Du, "Thermochemical Conversion of Microalgae for Biofuel Production", Disertasi. University of Minnesota: Minnesota, 2013.
- [10] X. Miao, Q. Wu, and C. Yang, "Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable Fuels", *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 71, 855-863, 2004.
- [11] S. Jamilatun, Budhijanto, Rochmadi, A. Yuliestyan, and A. Budiman, "Effect of grain size, temperature and catalyst amount on pyrolysis products of *Spirulina Platensis* Residue (SPR)", *International Journal of Technology* 10(3), 541-550, 2019
- [12] L. Chen, and K. Yoshikawa, "Bio-oil upgrading by cracking in two-stage heated reactors". *AIMS Energy*, 6(1): 203-215, 2018.
- [13] D. Houshmand, B. Roozbehani, and A. Badakhshan, "Thermal and Catalytic Degradation of Polystyrene with a Novel Catalyst". *Journal Emerging Technologies*, 5(1), 234 -238, 2016.
- [14] S. Jamilatun, A. Budiman, H. Anggorowati, A. Yuliestyan, Y. Surya Pradana, Budhijanto, and Rochmadi, "Ex-Situ Catalytic Upgrading of Secondary cracking oil using silica-alumina catalyst", *Int. J. Renew. Energy Res.* Vol. 9, No. 4, pp. 1733-1740.
- [15] U. Jena, and K.C. Das, "Comparative Evaluation of Thermochemical Liquefaction and Pyrolysis for Bio-Oil Production from Microalgae", *Energy & Fuels*, 25, 5472-5482, 2011.
- [16] A. Baimoldina, K. Papadakis, and E.Y. Konyshva, "Diverse impact of α -Fe₂O₃ with nano/micro-sized shapes on the catalytic fast pyrolysis of pinewood: Py-GC/MS study", *Analytical and Applied Pyrolysis*, 139, 145-155, 2019.
- [17] S. Jamilatun dan S. Salamah, "Pemanfaatan Asap Cair Food Grade yang Dimurnikan dengan Arang Aktif sebagai Pengawet Ikan Nila", *Eksergi*, 14 (2), 29-34, 2017.
- [18] P.S. Rezaei, H. Shafaghat, W. Daud, "Production of green aromatic and olefins by catalytic cracking oxygenated compounds derived from biomass pyrolysis", *Appl.Catal. A: Gen.*, 490(5) 11, 2011.
- [19] P. Pan, C.W. Hu, W.Y. Yang, Y.S. Li, L.L. Dong, L.F. Zhu, D.M. Tong, R.W. Qing, and Y. Fan, "The direct pyrolysis and catalytic pyrolysis of *Nannochloropsis* sp residue for renewable bio-oils", *Bioresource Technology*, 101, 4593-4599, 2011.
- [20] T. Dickerson, and J. Soria, "Catalytic fast pyrolysis: A Review", *Energy*, 6, 514-538, 2013.
- [21] Y. Yuan, T. Wang, and Q. Li, "Production of lowcarbon light olefins from catalytic cracking of crude bio-oil", *Chin. J. Chem. Phys.*, 26920, 237 – 244, 2013.
- [22] D.R. Vardon, B.K. Sharma, G.V. Blazina, K. Rajagopalan, T.J. Strathmann, "Thermochemical conversion of raw and defatted algal biomass via hydrothermal liquefaction and slow pyrolysis", *Bioresource Technology*, 109, 178-87, 2012.